



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Instalaciones Eléctricas

Teoría y Cálculo de las Corrientes de Cortocircuito

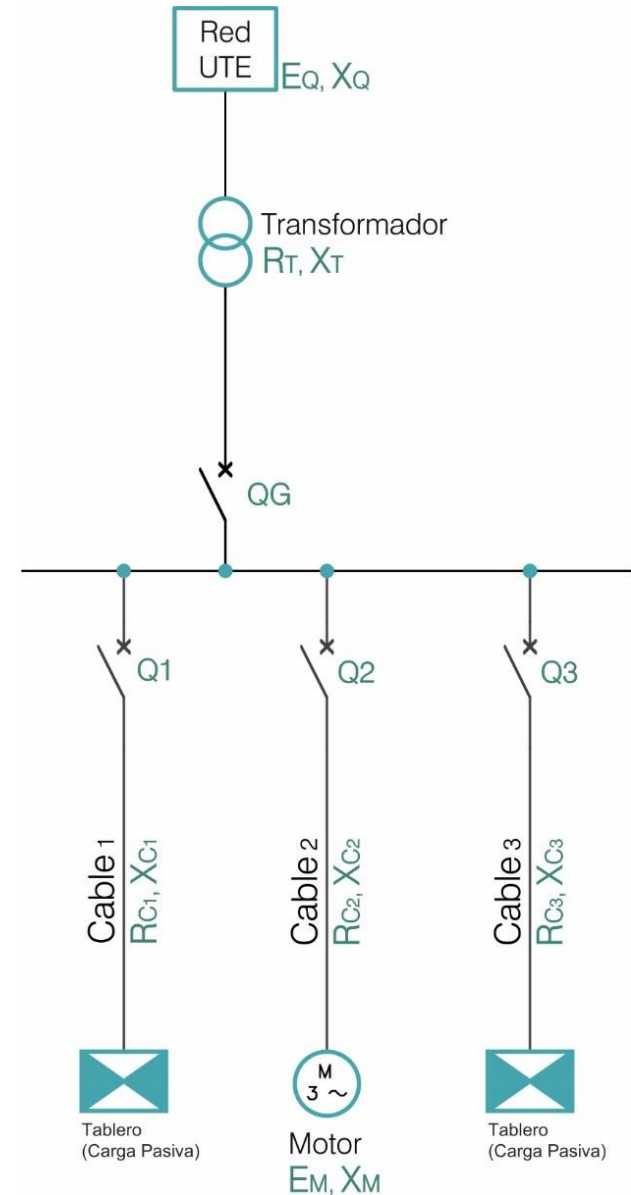
¿Qué es un cortocircuito?

Conexión de relativamente **baja resistencia o impedancia**, entre dos o más puntos de un circuito que están normalmente a tensiones diferentes.

- Cortocircuito: $I \gg I_n$, fenómeno impulsivo (milisegundos !!!)
- Sobrecarga: $I > I_n$, tiempos largos (segundos, minutos, ...)

¿Qué es un cortocircuito?

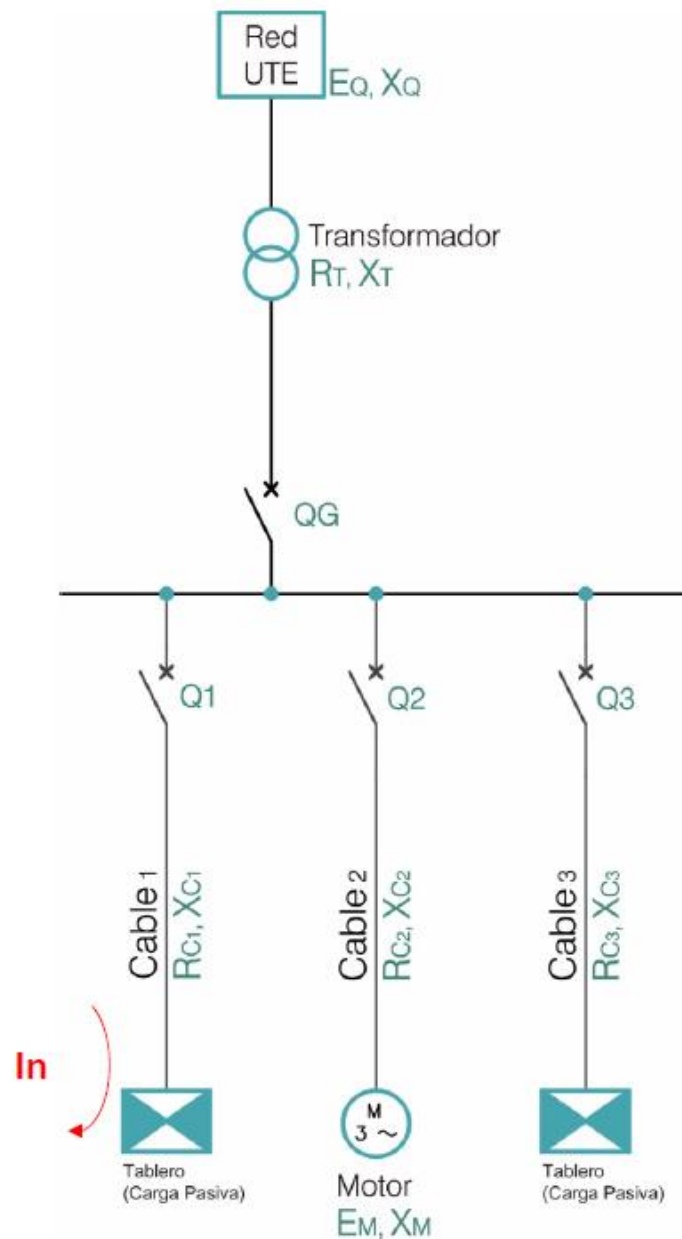
Consideremos un circuito de BT, alimentado desde la red pública, compuesto de tableros con cargas pasivas y de motores de inducción:



¿Qué es un cortocircuito?

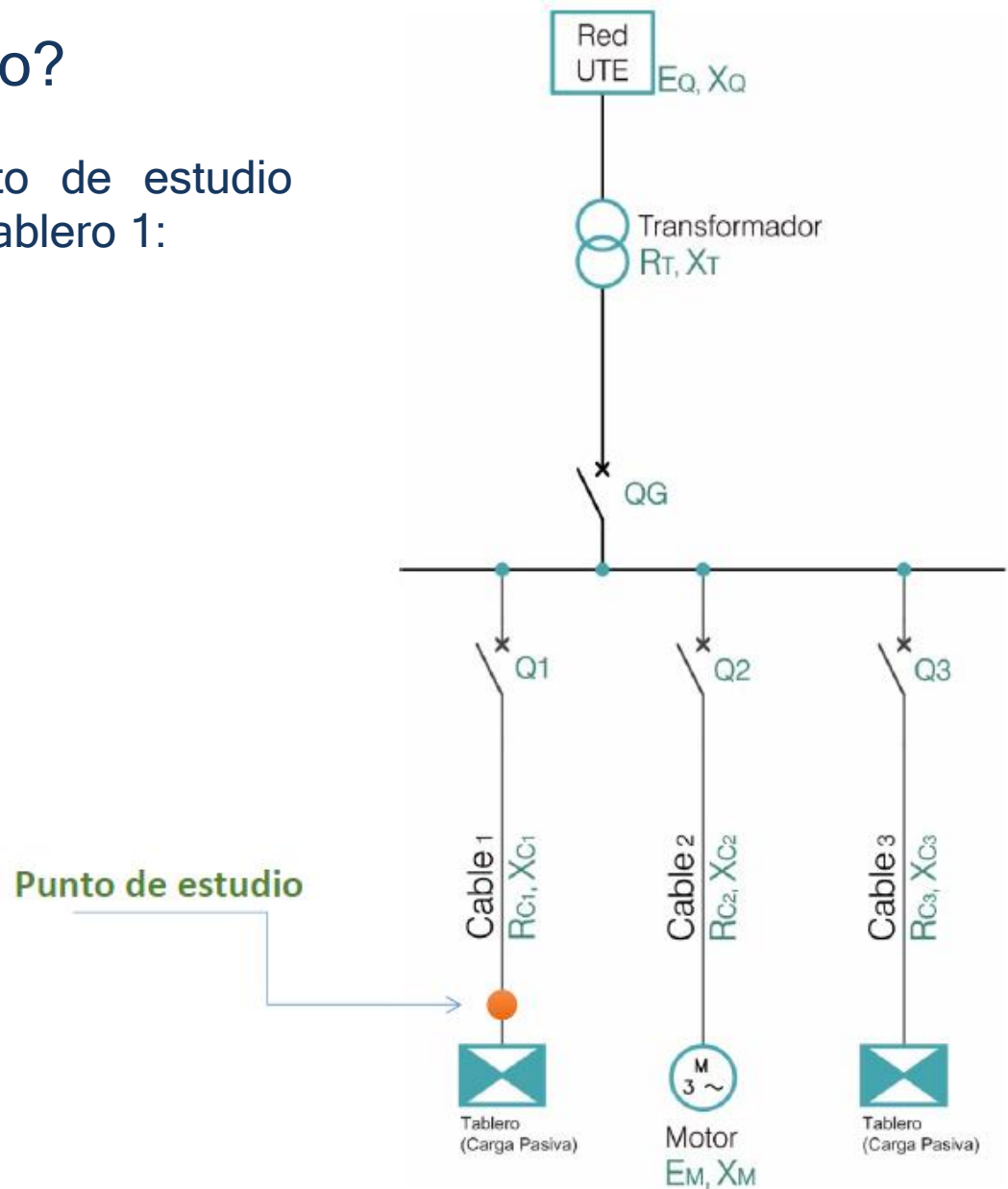
En régimen normal, las cargas consumen su corriente nominal.

Por ejemplo: el cable 1 es recorrido por I_n correspondiente al tablero que alimenta:



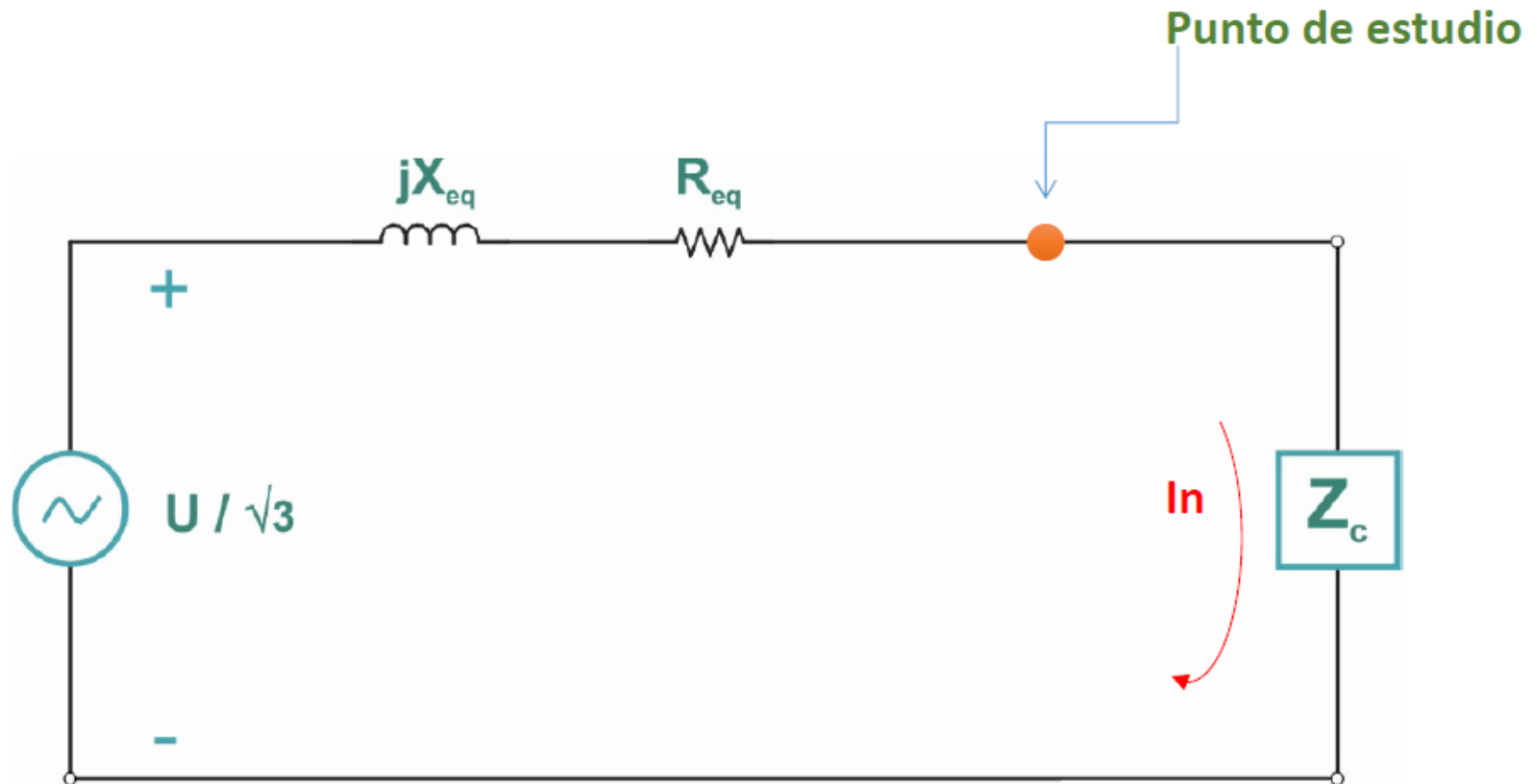
¿Qué es un cortocircuito?

Consideremos ahora el punto de estudio correspondiente a bornes del tablero 1:



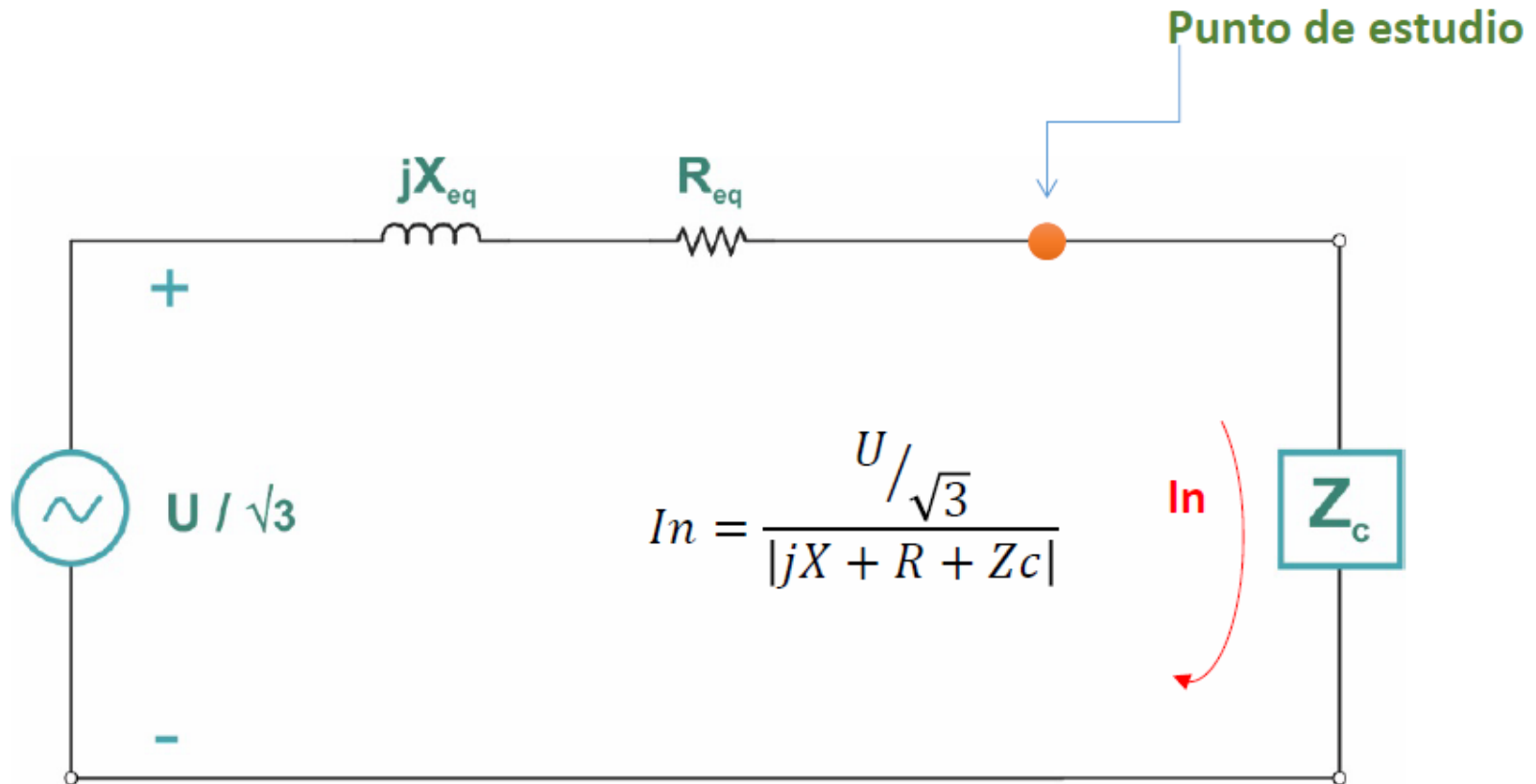
¿Qué es un cortocircuito?

Desde el punto de estudio, en régimen normal, se tiene una sola alimentación (red de UTE) y una impedancia vista aguas arriba, por lo que puede plantearse el equivalente Thévenin:



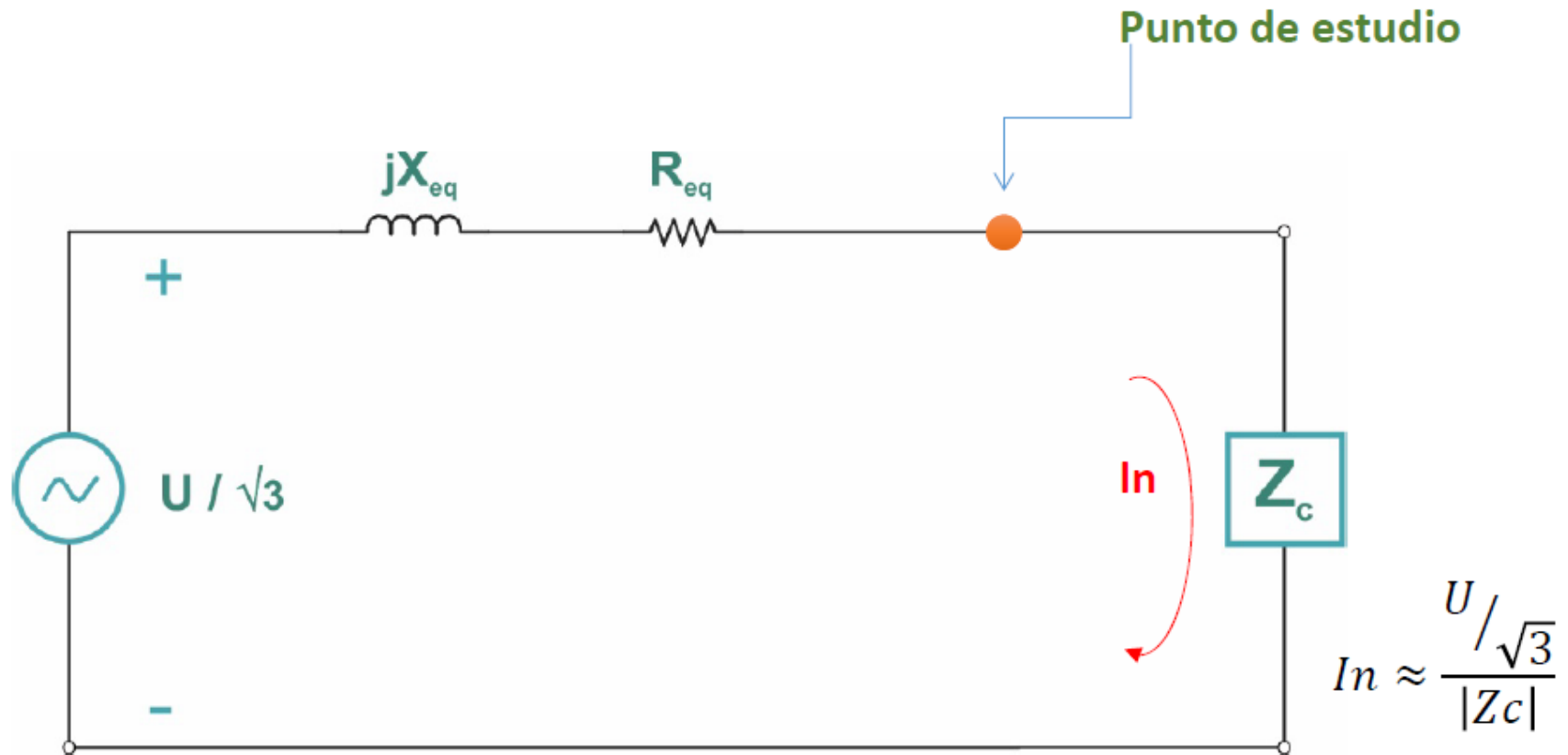
¿Qué es un cortocircuito?

Desde el punto de estudio, en régimen normal, se tiene una sola alimentación (red de UTE) y una impedancia vista aguas arriba, por lo que puede plantearse el equivalente Thévenin:



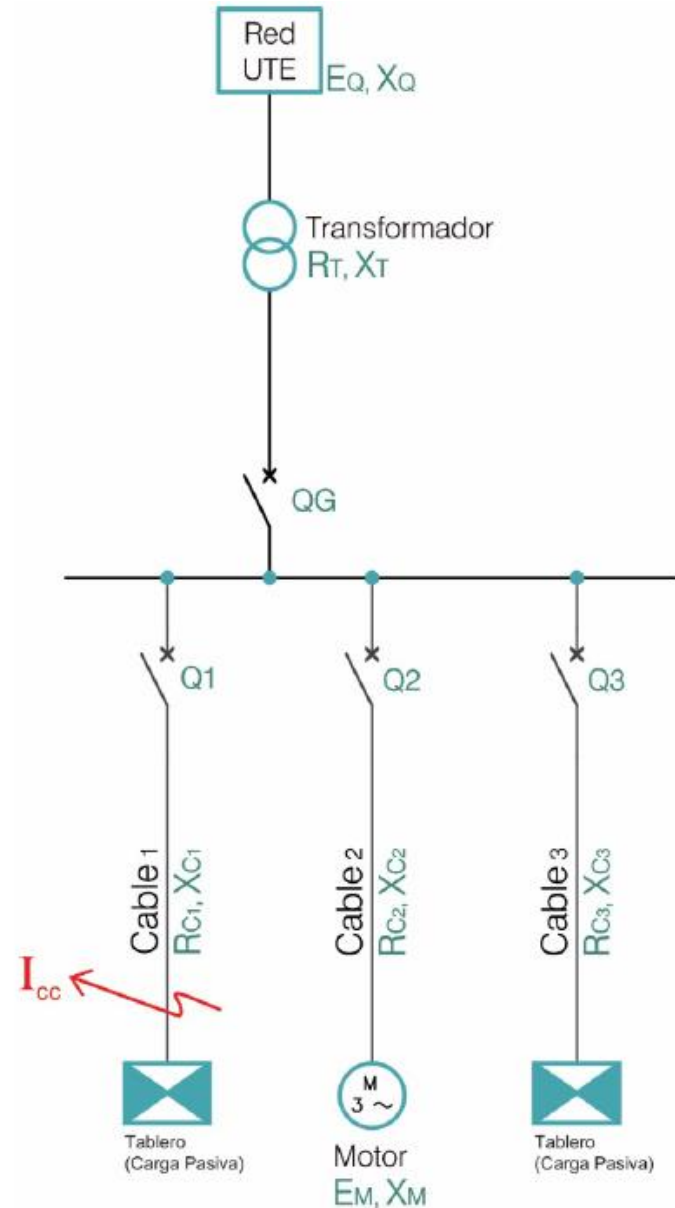
¿Qué es un cortocircuito?

La corriente nominal queda determinada casi exclusivamente por la impedancia de carga, dada la relación entre ésta y la impedancia vista aguas arriba:



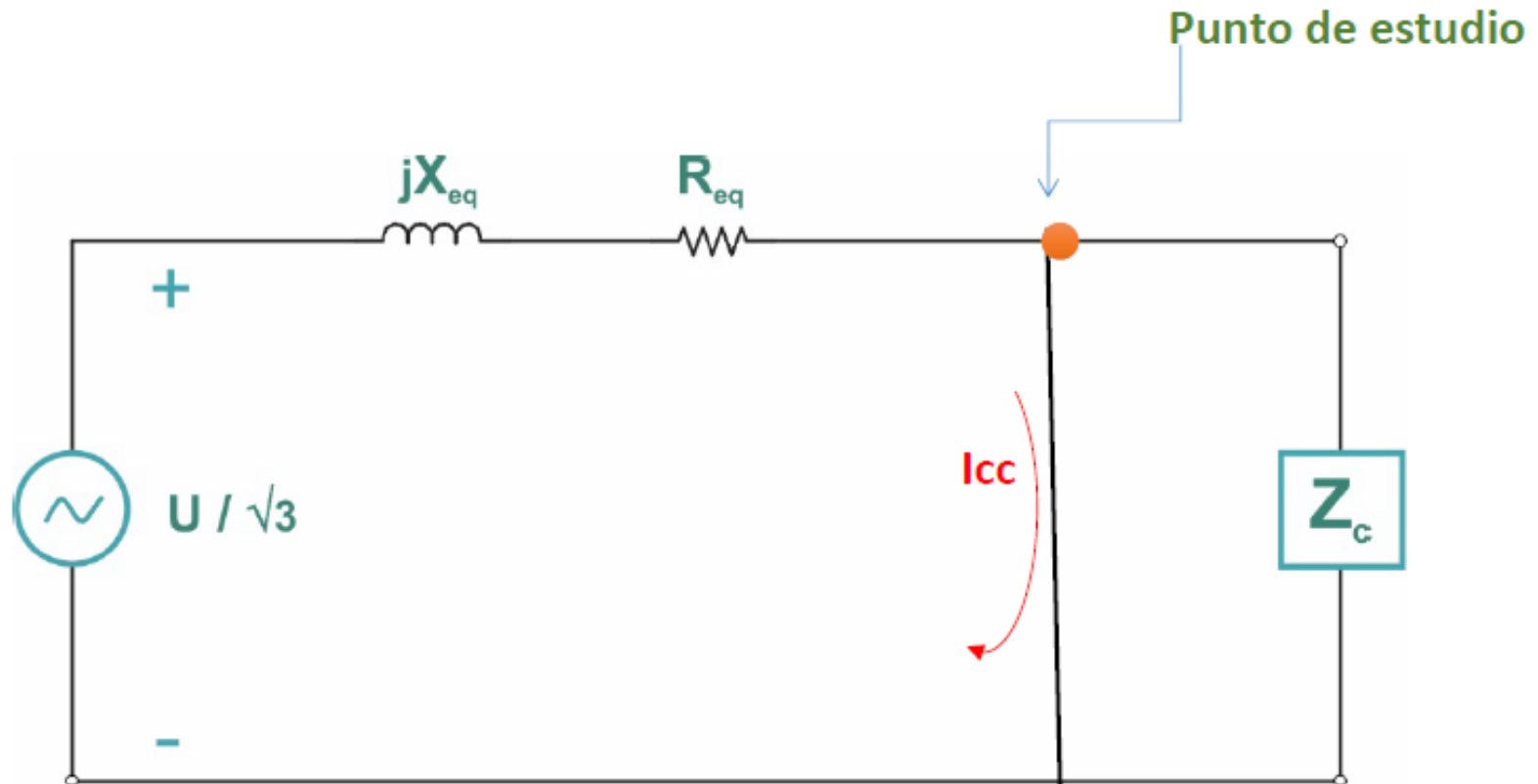
¿Qué es un cortocircuito?

Supongamos que se produce un CC trifásico en el punto de estudio, se tendrá un incremento rápido y de gran magnitud de la corriente que circula hasta ese punto:



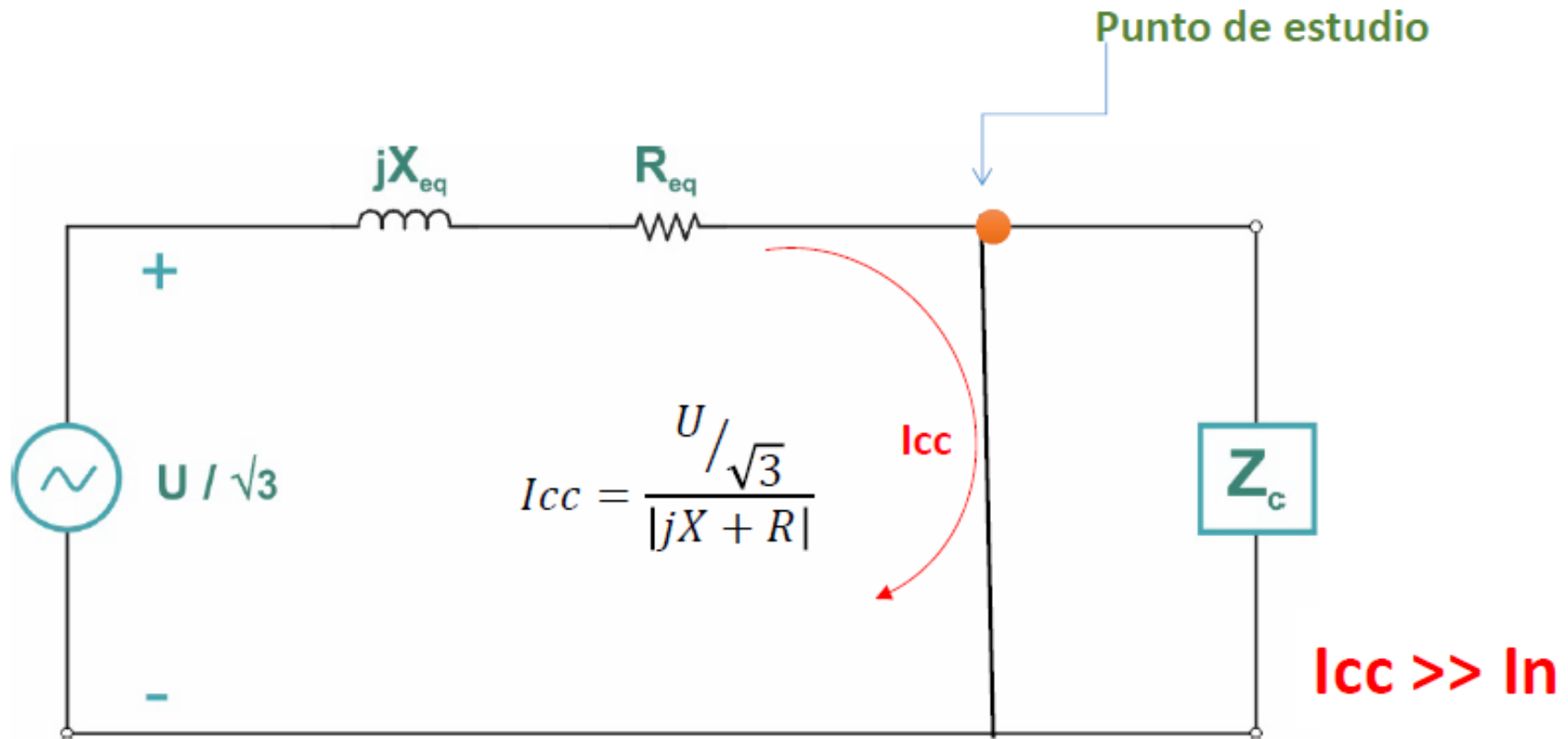
¿Qué es un cortocircuito?

Analizando la situación en el equivalente Thévenin:



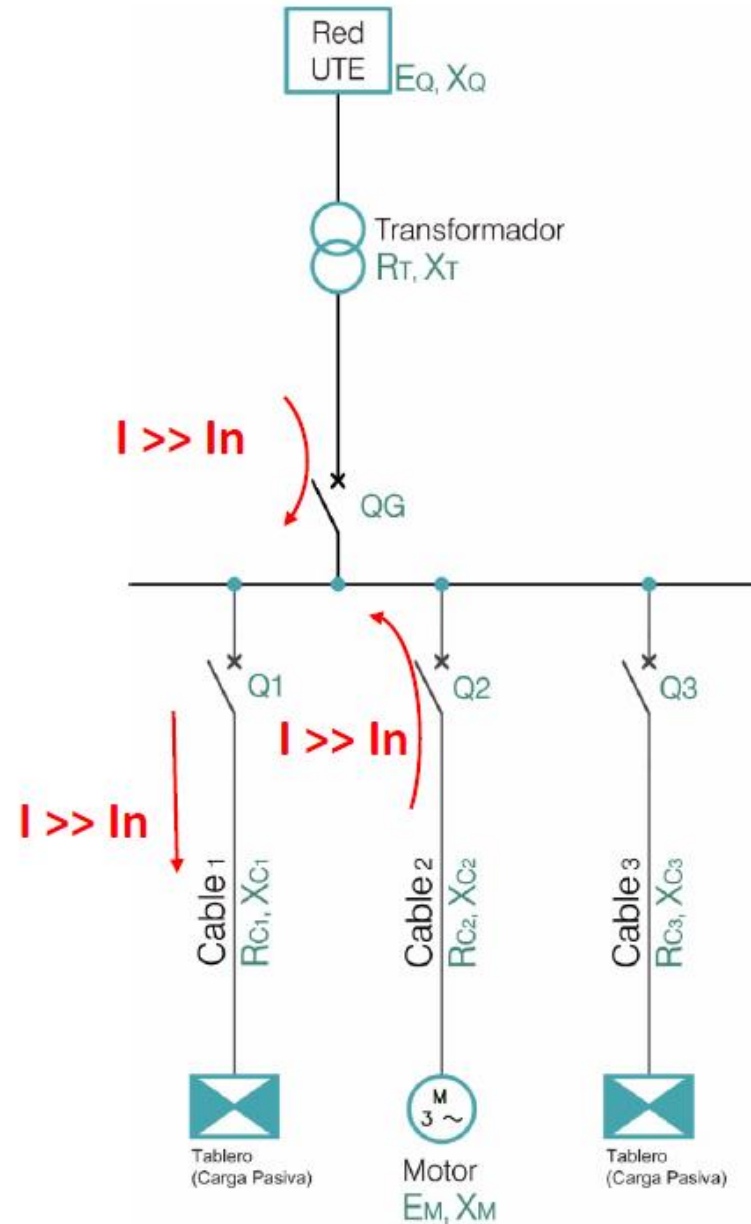
¿Qué es un cortocircuito?

Analizando la situación en el equivalente Thévenin:



¿Qué es un cortocircuito?

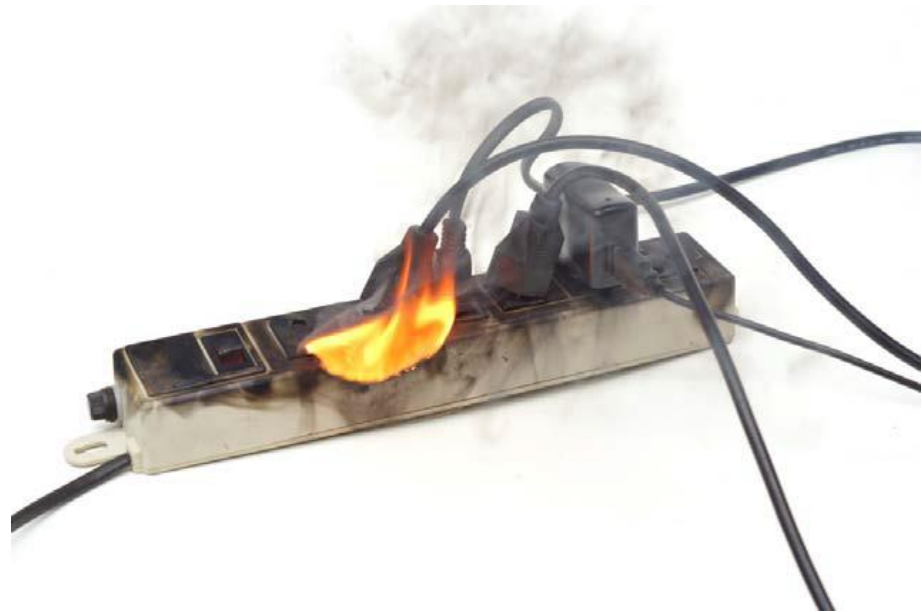
Considerando ahora la totalidad del circuito nuevamente, se observa que ahora se tienen **dos fuentes** que alimentan el CC:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

- Daños en aislamiento debido a sobrecargas o puntos de resistencia de contacto elevada:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

- Daños mecánicos en el aislamiento:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

- Daños mecánicos en el aislamiento :



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

- Daños mecánicos en el aislamiento:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

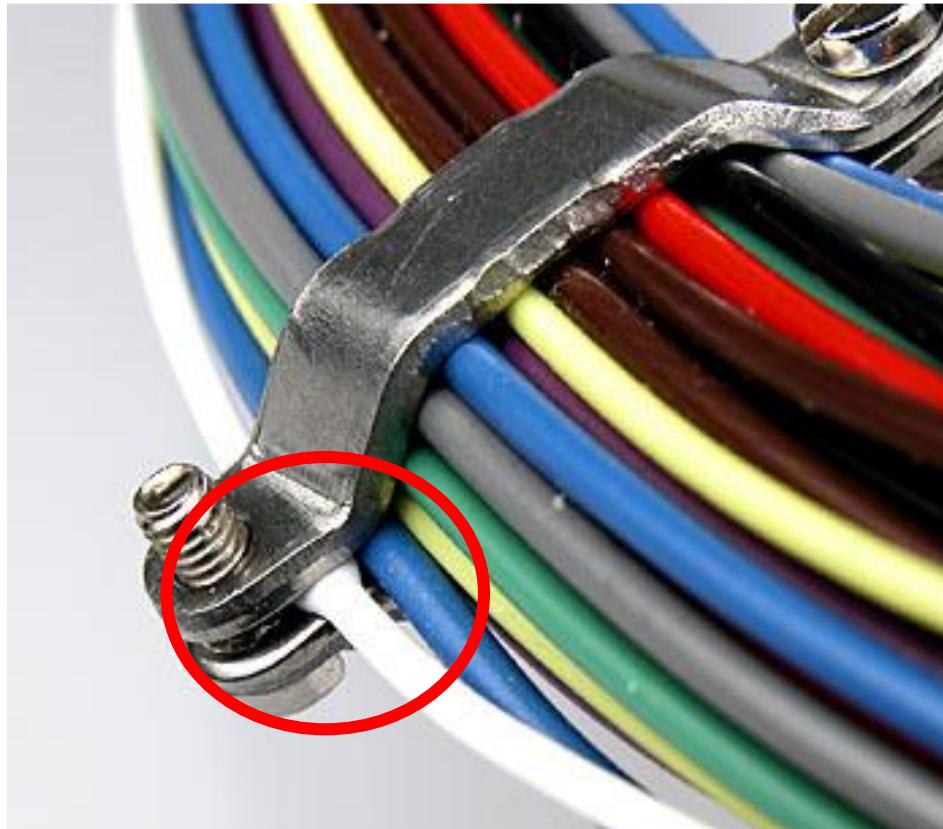
- Daños mecánicos en el aislamiento:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

- Daños mecánicos en el aislamiento:



Causas de los cortocircuitos

Los CC pueden producirse por una serie de causas:

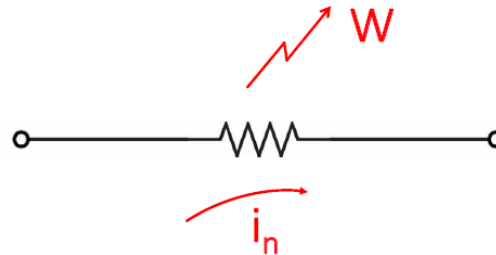
- Sobretensiones que generan un arco en un punto débil de la aislación:
 - De origen atmosférico
 - Debido a maniobras u otras faltas
- Otras causas: vandalismos, incendios, inundaciones, etc.

Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

A pesar de su breve duración, la magnitud de una corriente de CC hace que los efectos térmicos en los elementos de la instalación puedan resultar importantes:

Efecto Joule:

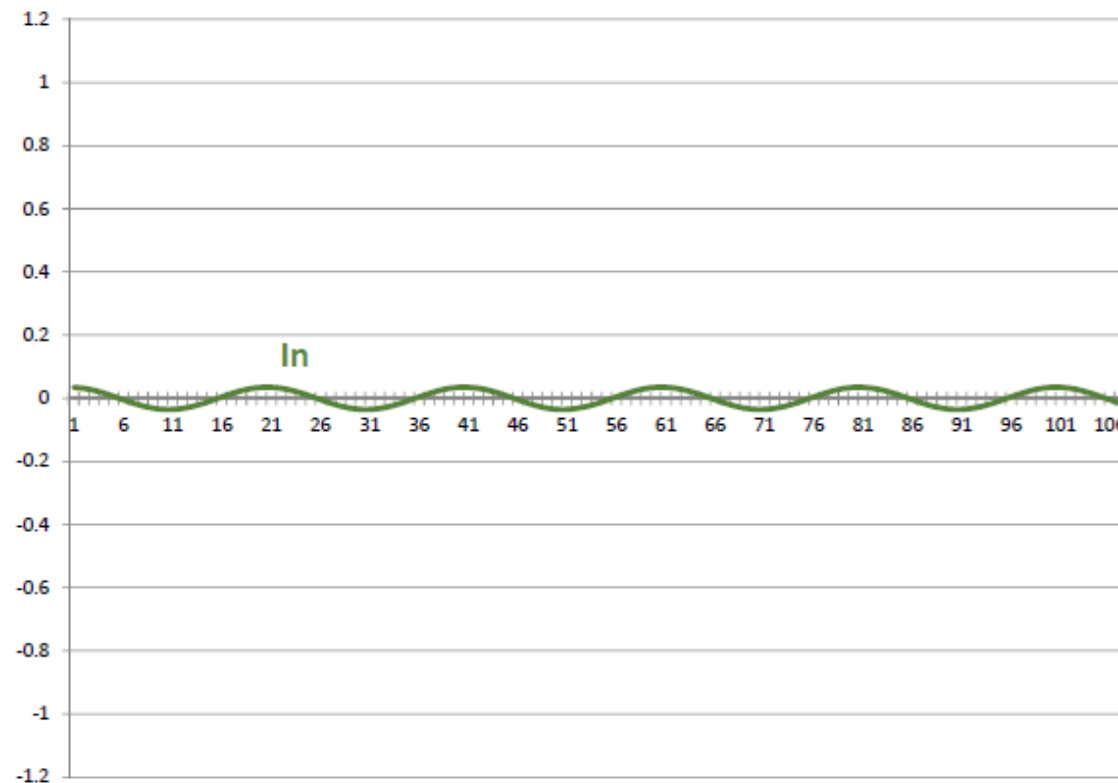


$$p = R \cdot i_n^2$$

Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

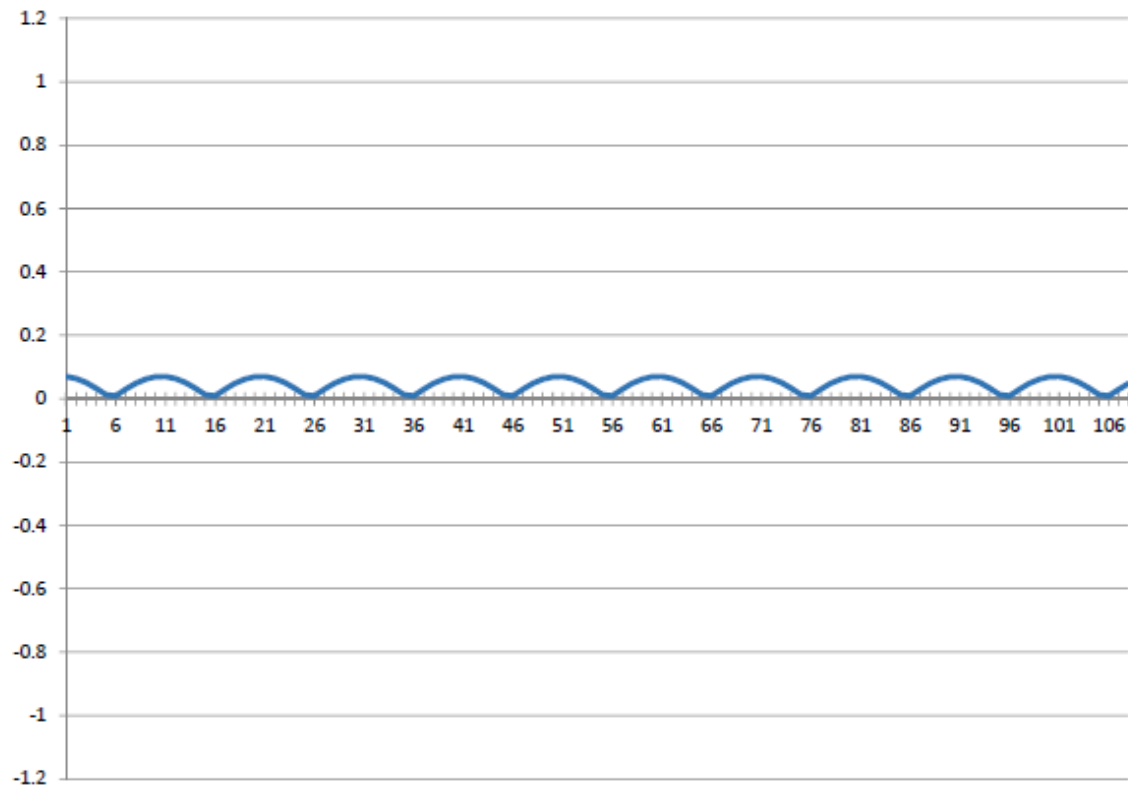
Ejemplo: corriente a lo largo de un conductor, en función del tiempo (ms), régimen normal:



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

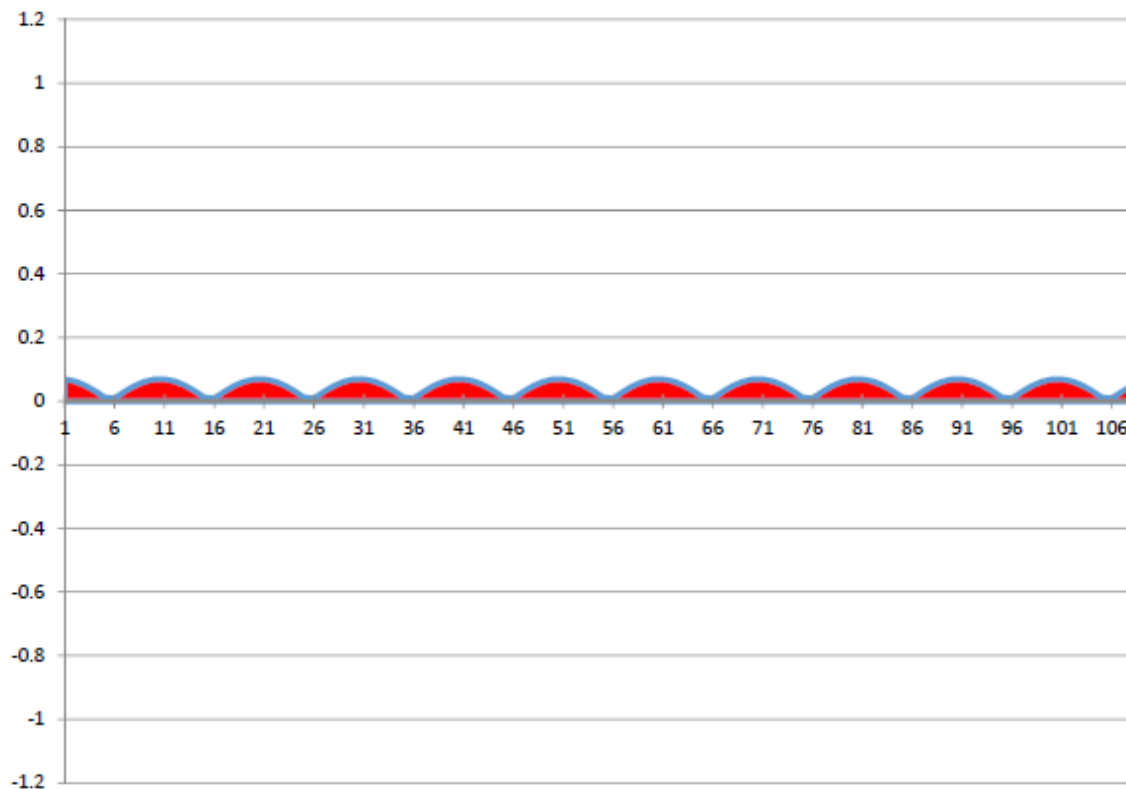
Potencia en el conductor debido al efecto Joule ($R \cdot I_n^2$):



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

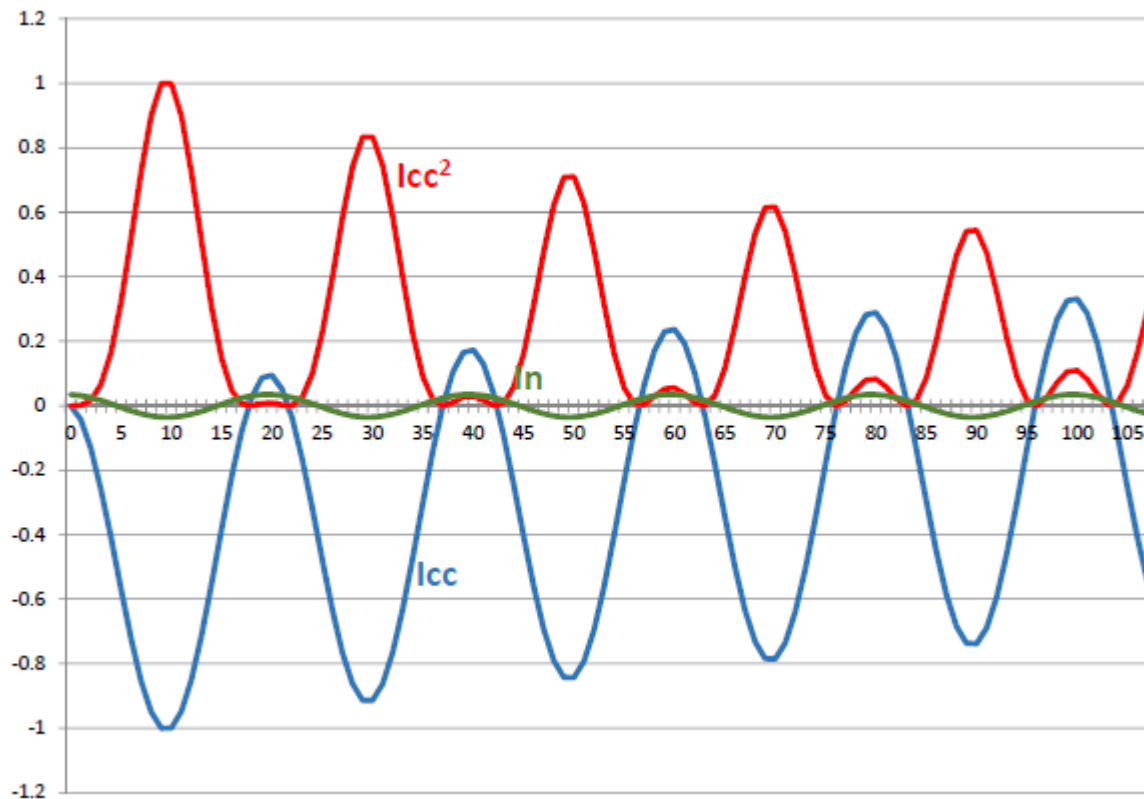
Energía en el conductor debido al efecto Joule ($R \cdot I_n^2$), la disipación al ambiente circundante es tal, que en régimen permanente la temperatura es estable:



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

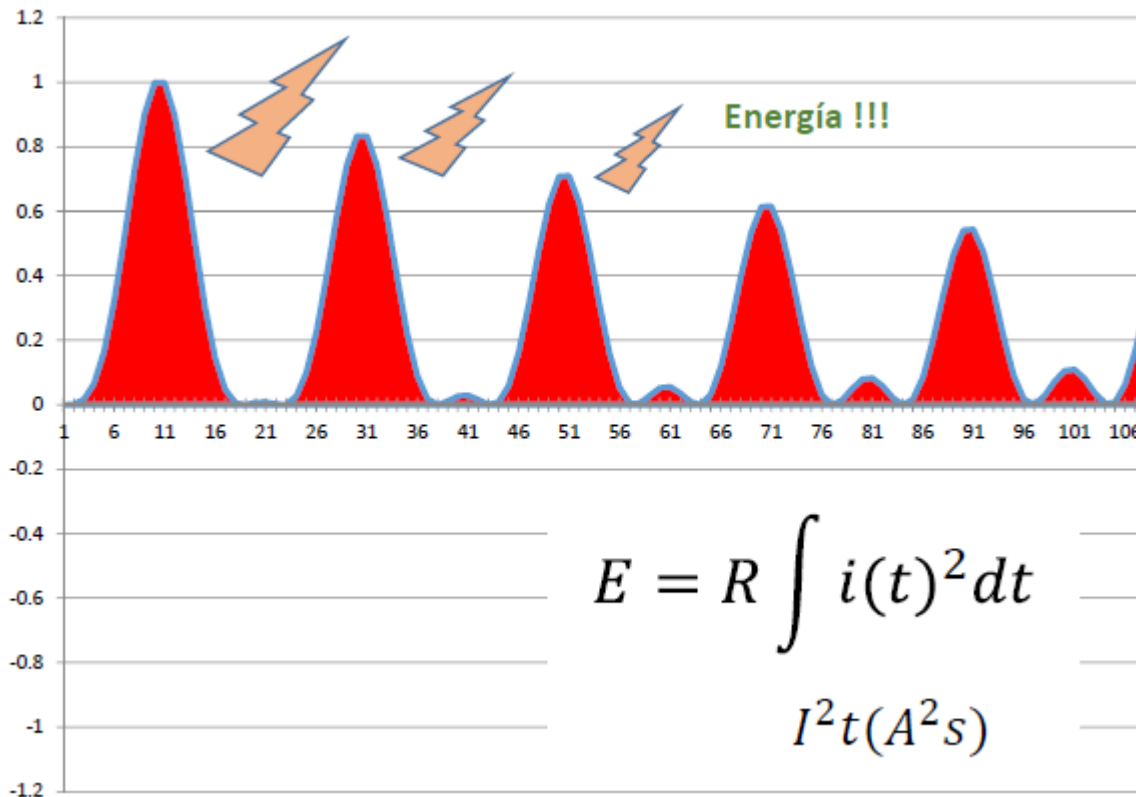
Durante un cortocircuito, la corriente es varias veces superior a la nominal, y la potencia debido a efecto Joule se incrementa cuadráticamente:



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos térmicos:

Durante un cortocircuito, la corriente es varias veces superior a la nominal, y la potencia debido a efecto Joule se incrementa cuadráticamente:

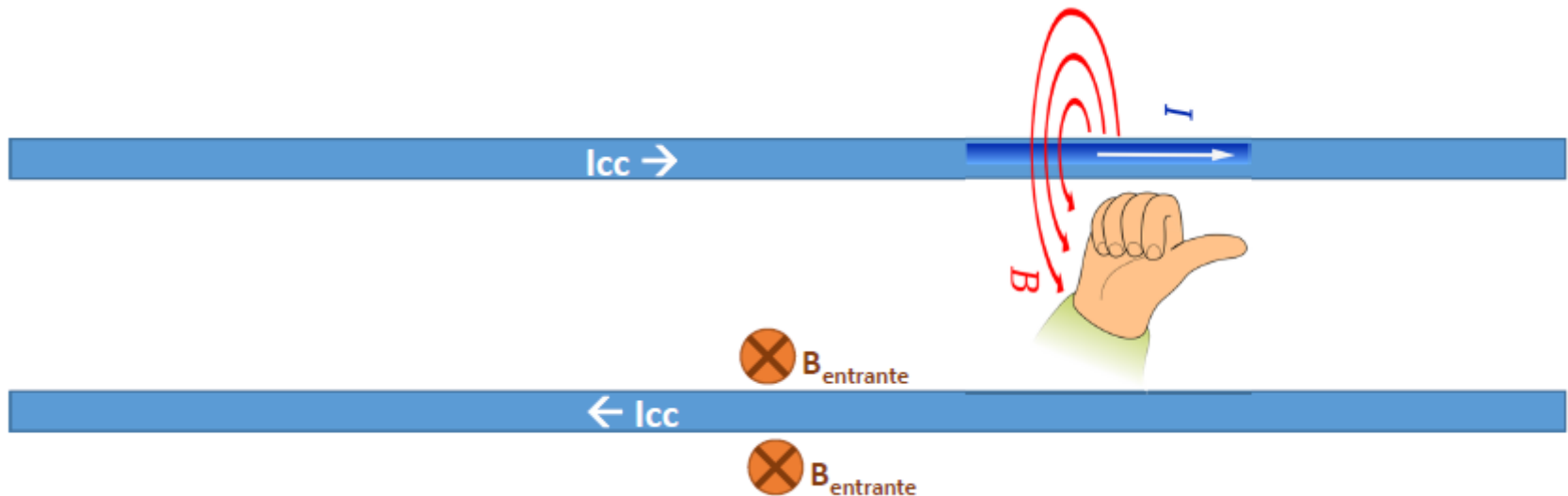


Los conductores deben poder absorber la energía generada durante un CC !!!

Efectos de los cortocircuitos

- Efectos electrodinámicos:

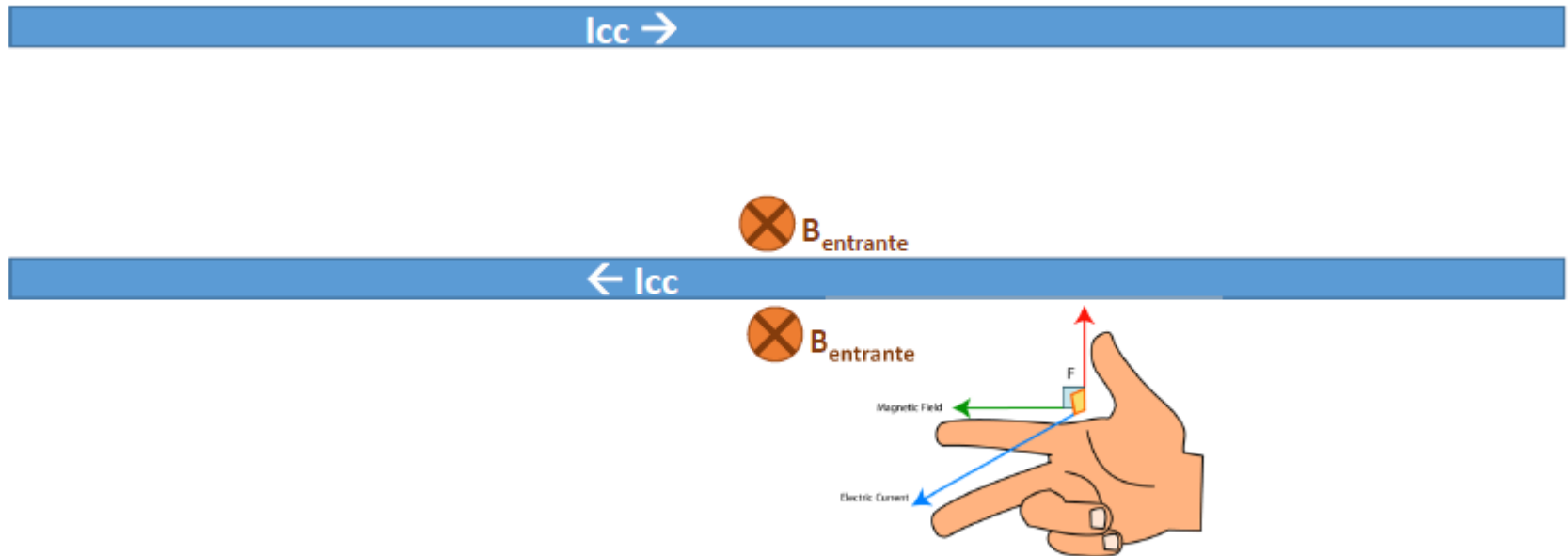
Se producen debido a la aparición de fuerzas entre conductores paralelos recorridos por corriente:



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos electrodinámicos:

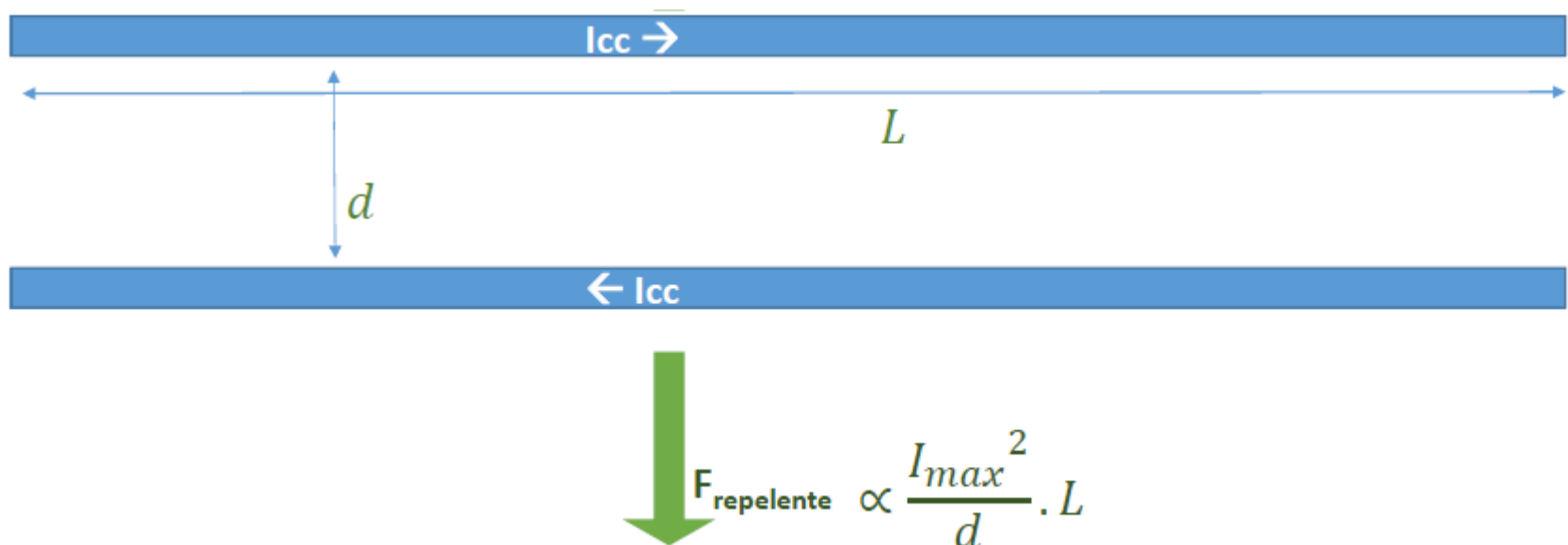
Se producen debido a la aparición de fuerzas entre conductores paralelos recorridos por corriente:



Efectos de los cortocircuitos

- Efectos electrodinámicos:

Se producen debido a la aparición de fuerzas entre conductores paralelos recorridos por corriente:

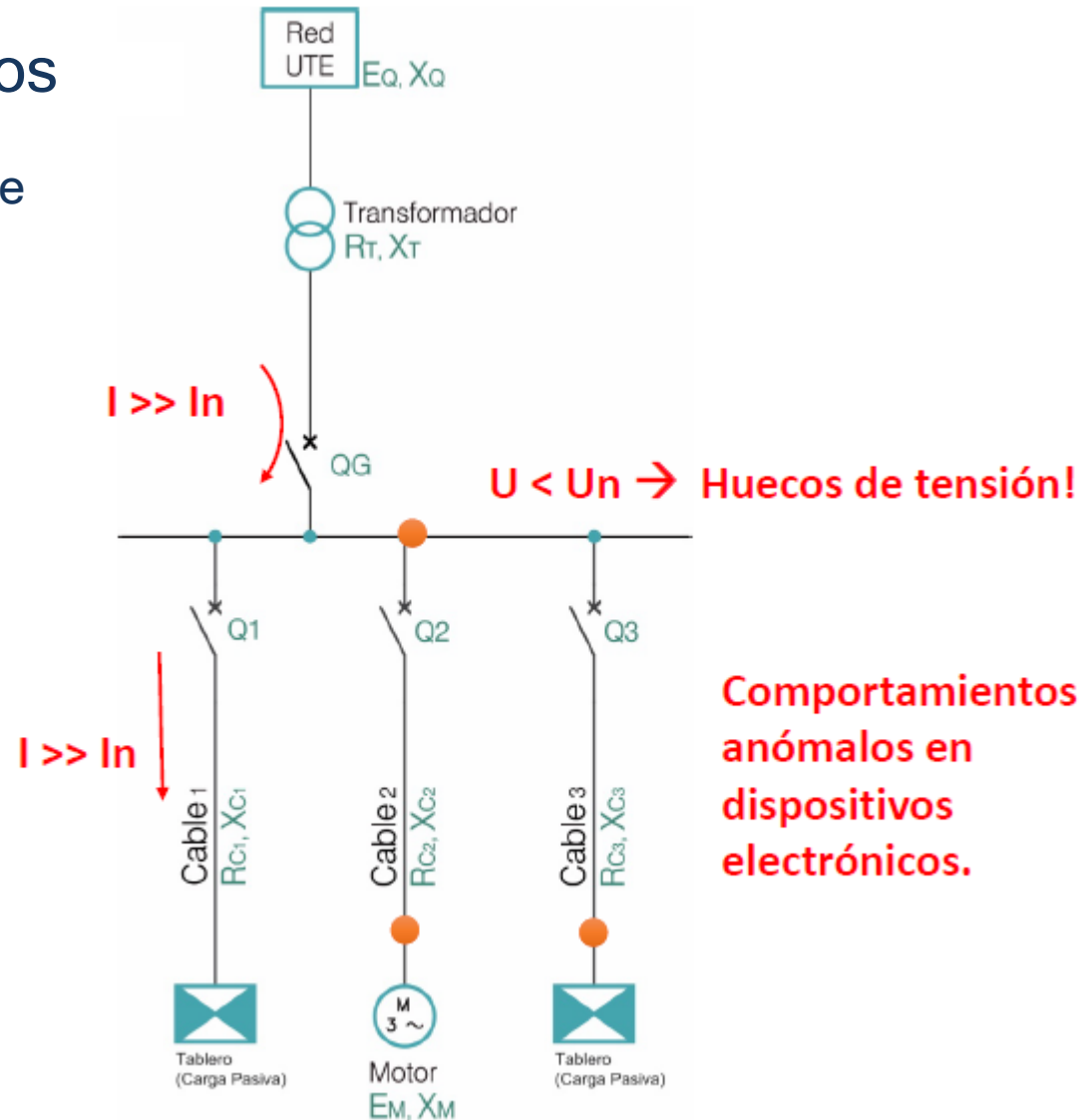


Efectos de los cortocircuitos

- Efectos distorsivos en el resto de la instalación:

Por ejemplo, “huecos” de tensión:

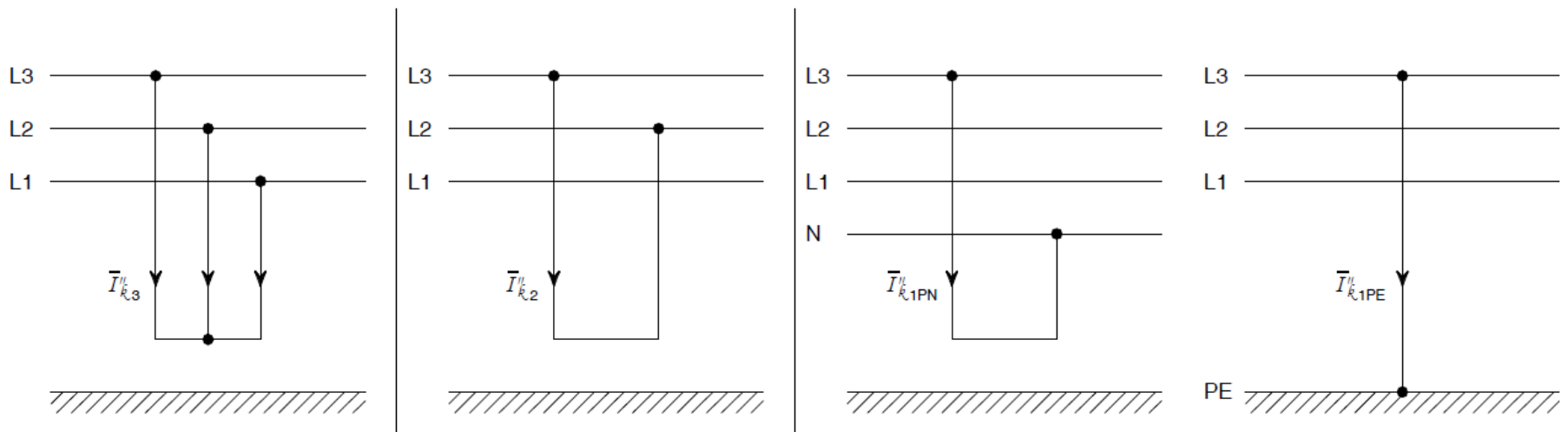
Subtensiones causadas por la corriente de cortocircuito.



Tipos de cortocircuitos

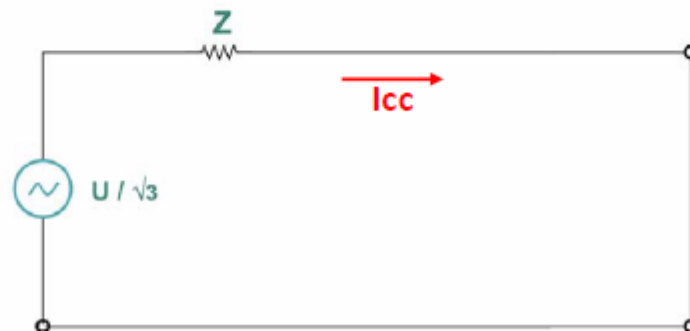
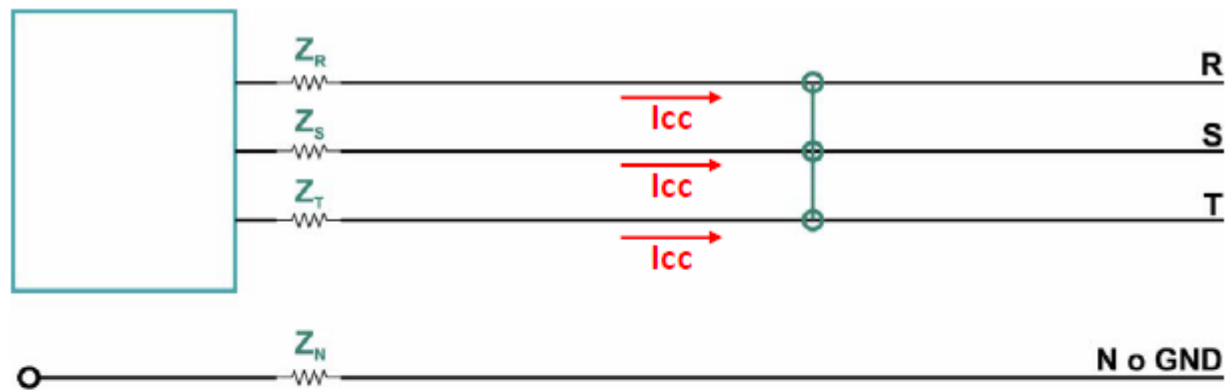
Se estudiarán tres tipos de cortocircuitos:

- Cortocircuito trifásico equilibrado.
- Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra).
- Cortocircuito monofásico fase-tierra y fase-neutro.



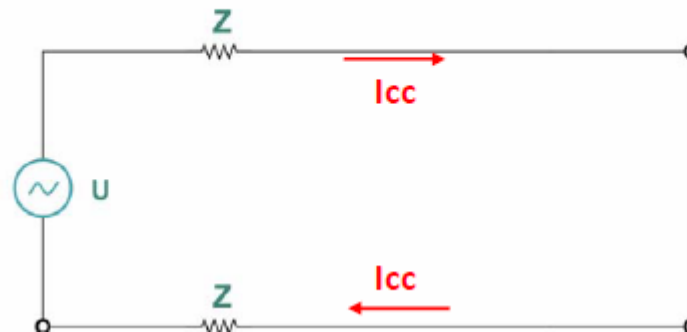
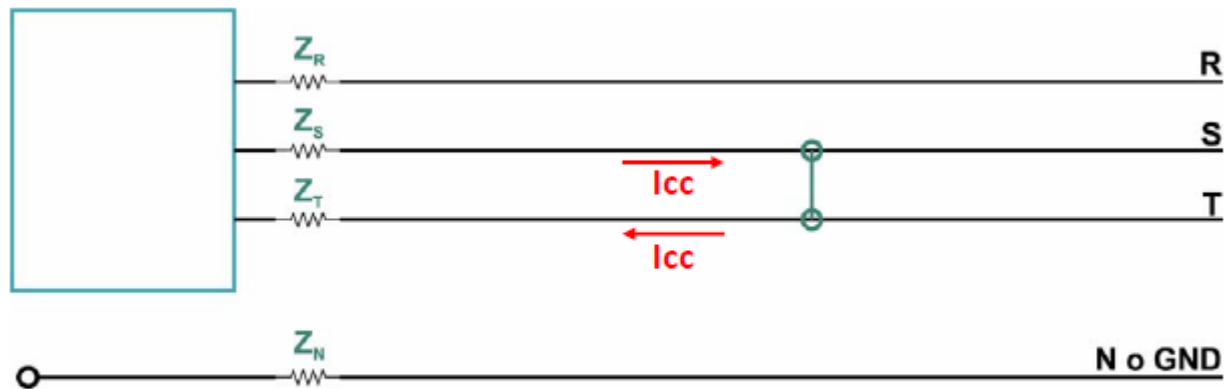
Tipos de cortocircuitos

- Cortocircuito trifásico equilibrado:



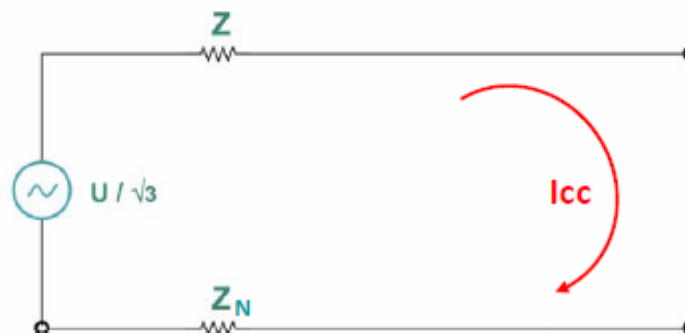
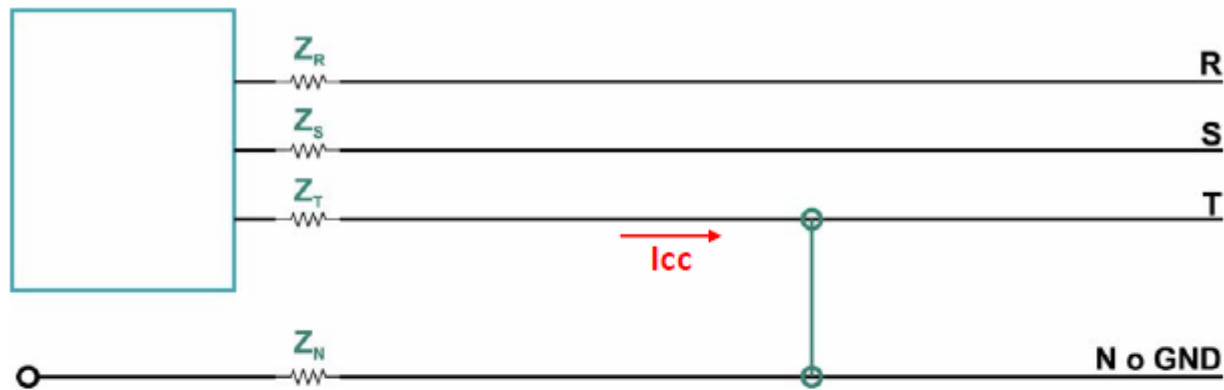
Tipos de cortocircuitos

- Cortocircuito entre dos fases aislado (sin conexión a tierra):



Tipos de cortocircuitos

- Cortocircuito monofásico fase-tierra o fase-neutro:



Tipos de cortocircuitos

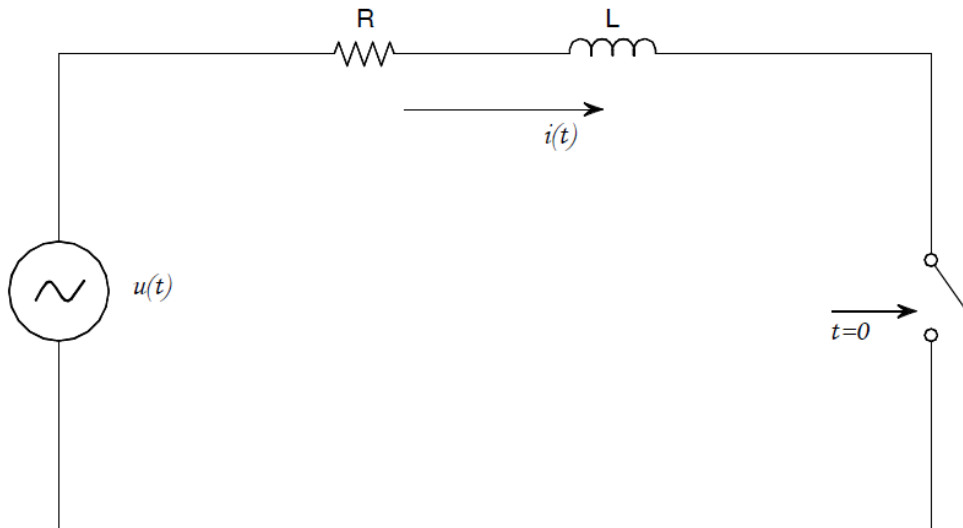
Porcentaje de incidencia de los cortocircuitos:

Tipos de cortocircuitos	Incidencia (%)
Monofásicos	80 %
Bifásicos	15 %
Trifásicos	5 %

- **Máxima corriente: CC trifásico.**
 - Poder de corte y cierre de los disyuntores.
 - Estructuras mecánicas para soportar los esfuerzos electromecánicos.
 - Cables y elementos eléctricos capaces de soportar la energía térmica.
- **Mínima corriente: CC fase-fase o fase-neutro.**
 - Ajuste de los dispositivos de protección de los conductores frente a cortocircuito.
- El CC fase-tierra se utiliza para elegir los dispositivos de protección contra los contactos eléctricos indirectos, y para diseñar los conductores de tierra de protección.

Forma de onda de la corriente de cortocircuito

Si se cierra un circuito R-L alimentado desde una fuente de tensión alterna, se tiene una respuesta transitoria, seguida por un régimen permanente:



$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \left[\text{sen}(\omega \cdot t + \varphi - \theta) - \text{sen}(\varphi - \theta) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \right]$$

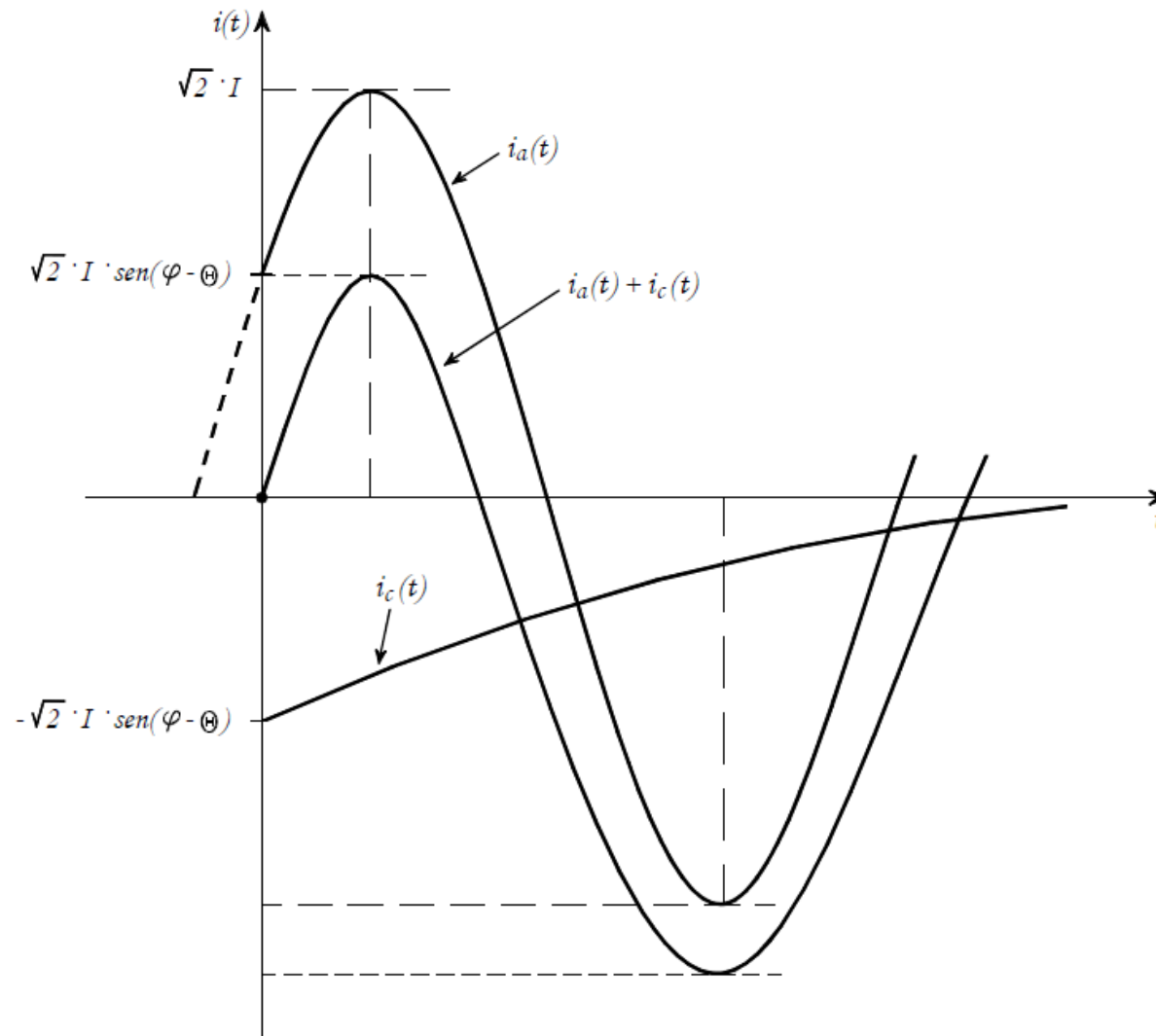
Componente AC:

$$i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi - \theta)$$

Componente DC:

$$i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\theta - \varphi) \cdot e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}$$

Forma de onda de la corriente de cortocircuito



Forma de onda de la corriente de cortocircuito

El grado de asimetría de la onda dependerá del valor inicial de la tensión al cerrar el circuito y de la relación R/X del circuito:

Ubicación del cortocircuito	R/X	$\tau = L/R$ (s)
MT	0.1	0.032
BT en bornes del transformador	0.2	0.016
BT alejado del transformador	1.0	0.003

Forma de onda de la corriente de cortocircuito

En una instalación de BT, las fuentes que aportan al CC, denominadas **elementos activos** son:

- Red de suministro de energía eléctrica de la distribuidora (UTE).
- Máquinas eléctricas síncronas (generadores y motores).
- Máquinas eléctricas asíncronas (motores).

El resto de los elementos de la instalación son **elementos pasivos**, no aportan al CC:

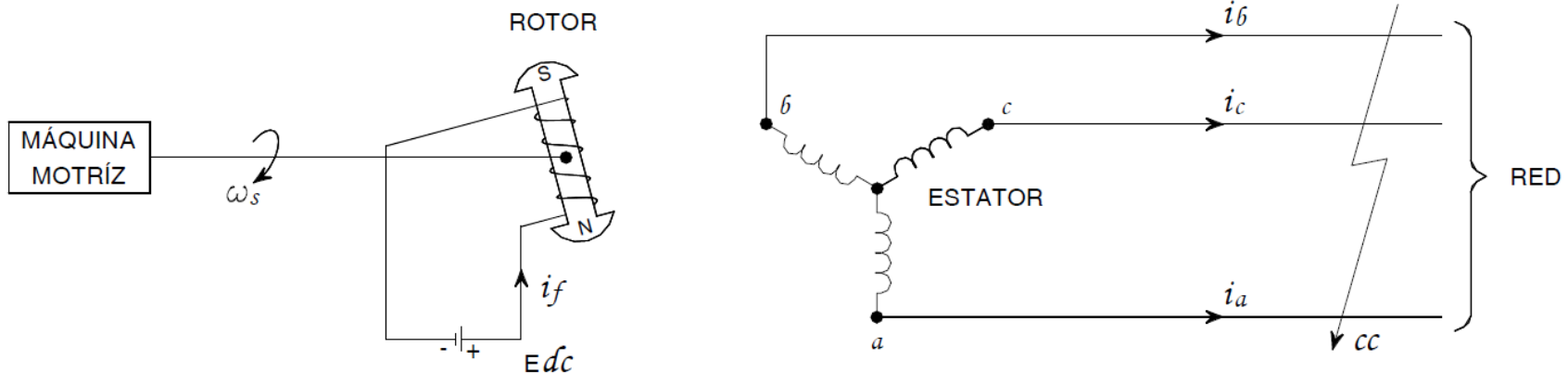
- Transformadores
- Barras y conductores
- Cargas pasivas (no motores)

Forma de onda de la corriente de cortocircuito

La amplitud de la componente alterna **no es constante**, debido a la presencia de máquinas rotativas:

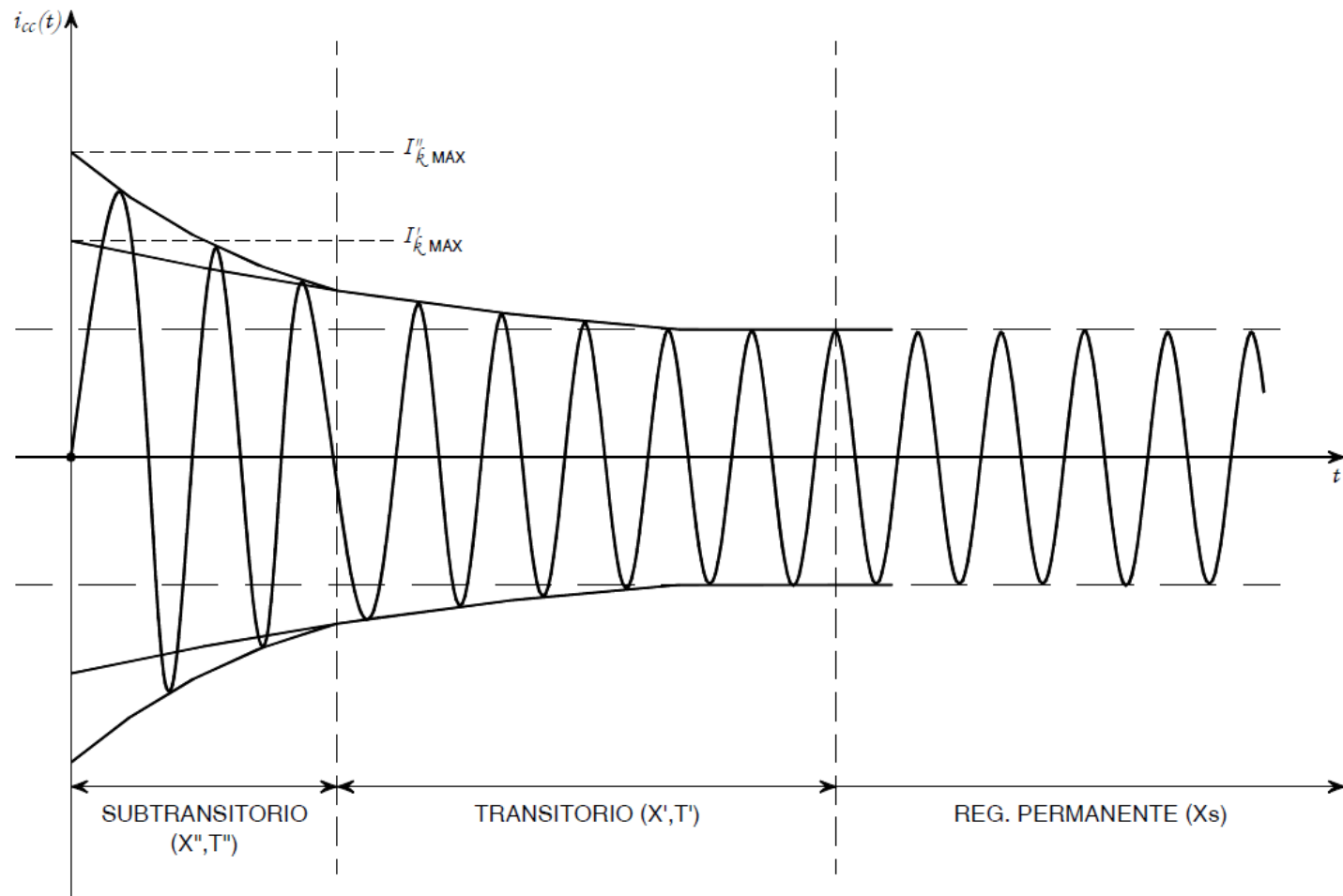
- **Máquina síncrona:**

Conforma gran parte de los generadores de la red, su comportamiento ante el cortocircuito se compone de tres períodos: subtransitorio, transitorio y régimen permanente.



Forma de onda de la corriente de cortocircuito

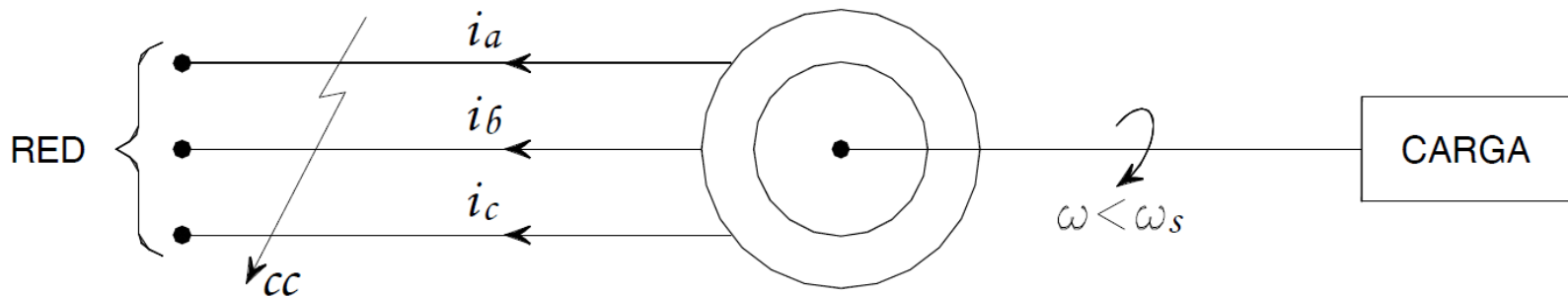
- Máquina síncrona, corriente de CC:



Forma de onda de la corriente de cortocircuito

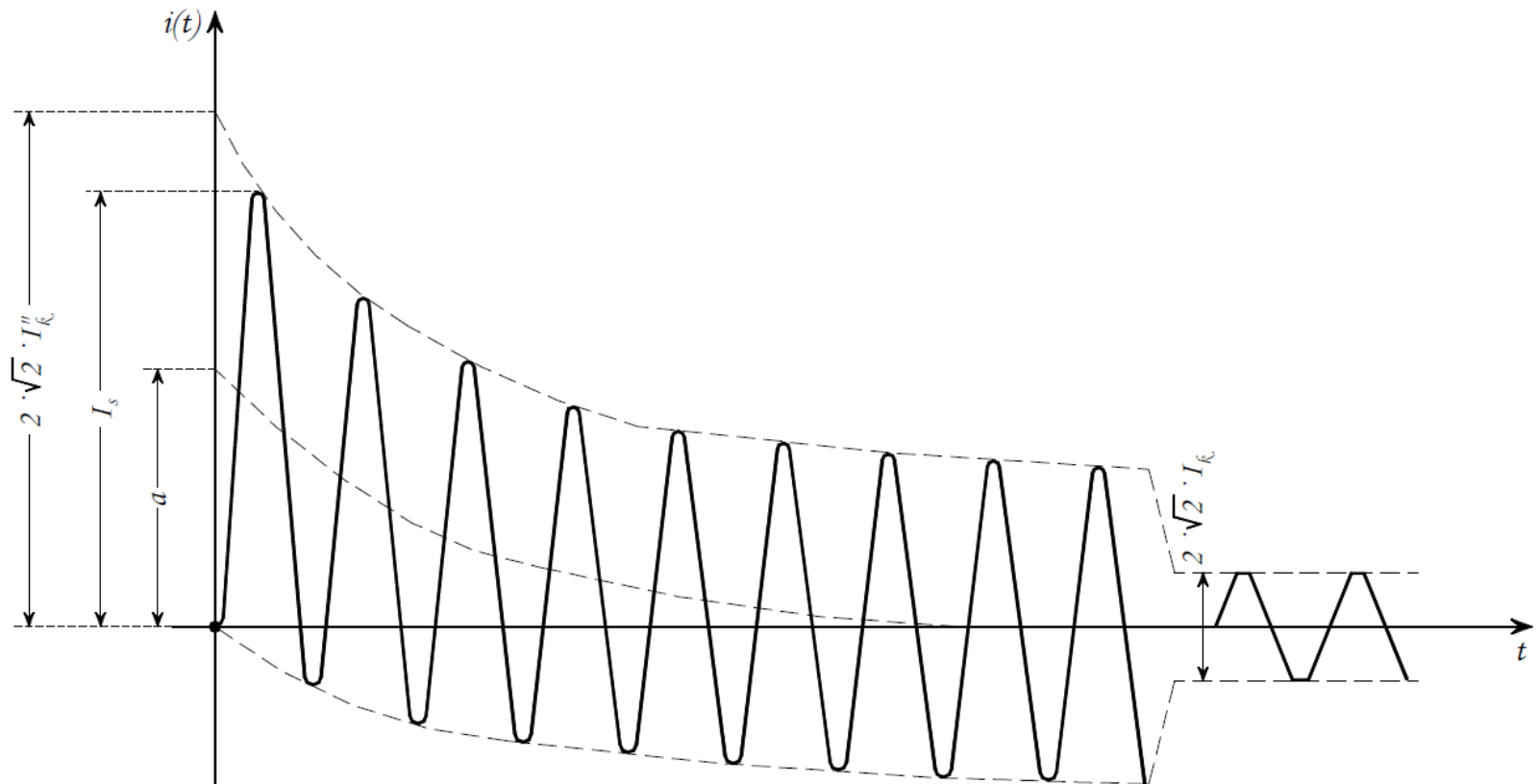
- **Máquina asíncrona (motor de inducción):**

Es el tipo de motor con mayor uso industrial. Presenta un aporte al CC rápido (algunos ciclos) debido al campo magnético residual y a la inercia de la carga mecánica que lo mantiene rotando.



Forma de onda de la corriente de cortocircuito

Entonces en forma genérica, la forma de onda de la corriente de CC en un punto de una instalación resulta:



Forma de onda de la corriente de cortocircuito

En función de esa forma de onda genérica se definen algunas corrientes:

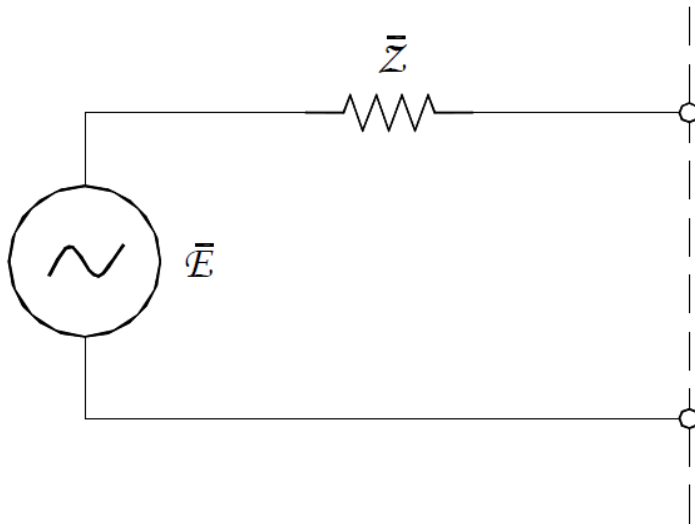
- **Corriente de cortocircuito prevista:** Corriente que circularía si el cortocircuito fuera remplazado por una conexión ideal de impedancia despreciable, sin ninguna modificación de la alimentación.
- **Corriente de cortocircuito simétrica inicial (I''_k):** Valor eficaz de la componente AC de la corriente de cortocircuito prevista, en el instante de la aparición del cortocircuito, si la impedancia conserva su valor inicial.
- **Valor de cresta de la Corriente de Cortocircuito (I_S):** Valor instantáneo máximo posible de la corriente de cortocircuito prevista.

Se considera la peor condición de asimetría: $I_S = 1.6\sqrt{2}I''_k = 2.26I''_k$

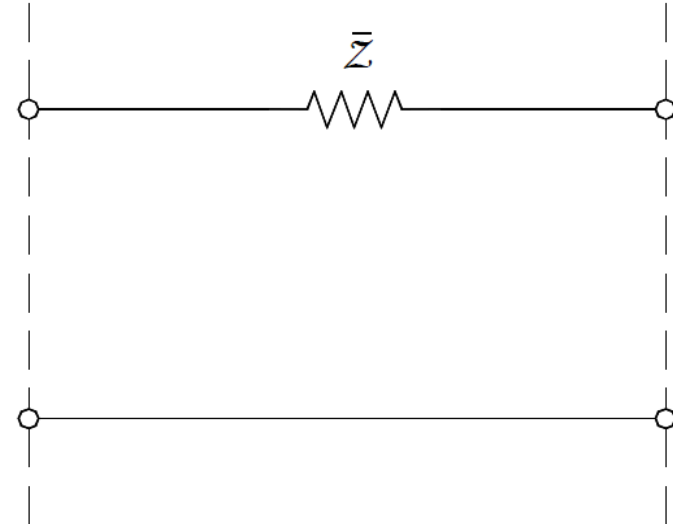
- **Corriente de cortocircuito permanente (I_k):** Valor eficaz de la corriente de cortocircuito que se mantiene tras la extinción de los fenómenos transitorios.

Modelado de elementos ante el CC

Como se indicaba anteriormente, ante un CC los elementos de una instalación responderán de forma diferente (activos y pasivos), se modelarán de la siguiente forma:



Elementos activos



Elementos pasivos

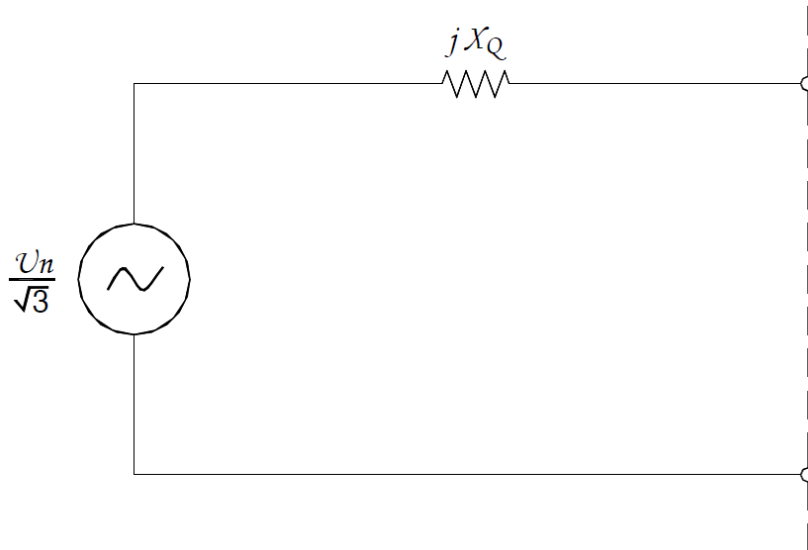
Modelado de elementos ante el CC

- Red de UTE

Se define por su nivel de tensión y potencia de cortocircuito trifásica:

$$S''_{kQ} = \sqrt{3} \cdot U_{nQ} \cdot I''_{kQ}$$

En general se desprecia la componente resistiva de la impedancia vista.



$$X_Q = \frac{U_{nQ}^2}{S''_{kQ}}$$

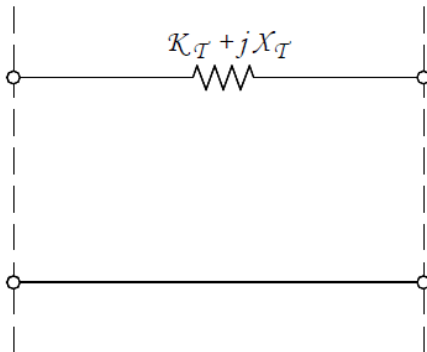
Modelado de elementos ante el CC

- Transformadores

Son elementos pasivos, se modelan con su impedancia de CC, expresada en %, o por unidad:

$$Z_T = \frac{u_{kT}(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

La componente resistiva de la Z_T se calcula a partir de las pérdidas en el cobre del transformador y de la corriente nominal.



$$Z_T = \frac{u_{kT}(\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

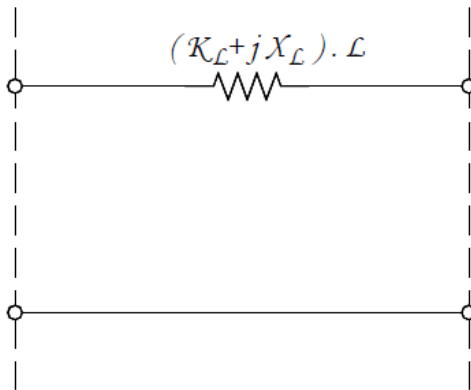
$$R_T = \frac{P_{cu}}{3 \cdot I_n^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

Modelado de elementos ante el CC

- Conductores (cables y barras)

También son elementos pasivos, su efecto ante un CC viene dado por la resistencia y reactancia de los mismos:



$$\overline{Z}_L = \left(\frac{\rho}{S} + j \cdot x_L \right) \cdot L$$

Valores típicos de reactancia por unidad de cables y barras en BT:

- $x_L = 0.08$ Ohm/km para cables tripolares o unipolares tendidos en trifolio.
- $x_L = 0.09$ Ohm/km para cables unipolares tendidos en plano juntos.
- $x_L = 0.15$ Ohm/km para cables unipolares tendidos en plano separados.

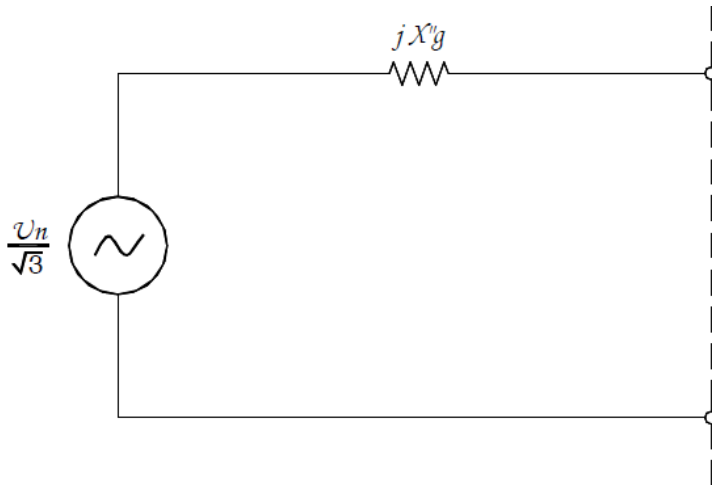
Modelado de elementos ante el CC

- Generadores y Motores Síncronos

Se modelan mediante la reactancia subtransitoria:

$$X''_g = \frac{x''_d (\%) \cdot U_n}{100 \cdot S_n}$$

Puede asumirse que la impedancia de la máquina es inductiva pura.



$$X''_g = \frac{x''_d (\%) \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

Modelado de elementos ante el CC

- Motores Asíncronos

Se considera la hipótesis de que la corriente que entrega al motor al cortocircuito es la misma que consume en el arranque.

$$X_m = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_a} = \frac{I_n}{I_a} \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n} = \frac{I_n}{I_a} \frac{U_n^2}{S_n}$$

Para los cálculos se considera $I_a \cong 5I_n$ y se desprecia la componente resistiva de la impedancia de cortocircuito del motor:

$$\overline{Z}_m \cong jX_m = j \cdot 0.2 \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$S_n = \frac{P_n \cdot 0.745}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

Modelado de elementos ante el CC

- Motores Asíncronos

Para grupos de motores, de los que no se tienen datos individuales, se puede modelar por un motor equivalente, despreciando los cables de conexión, con las hipótesis de cálculo:

$$I_a \cong 5I_n \quad \eta \cdot \cos \varphi = 0.8$$

En ese caso la impedancia equivalente del grupo de motores será:

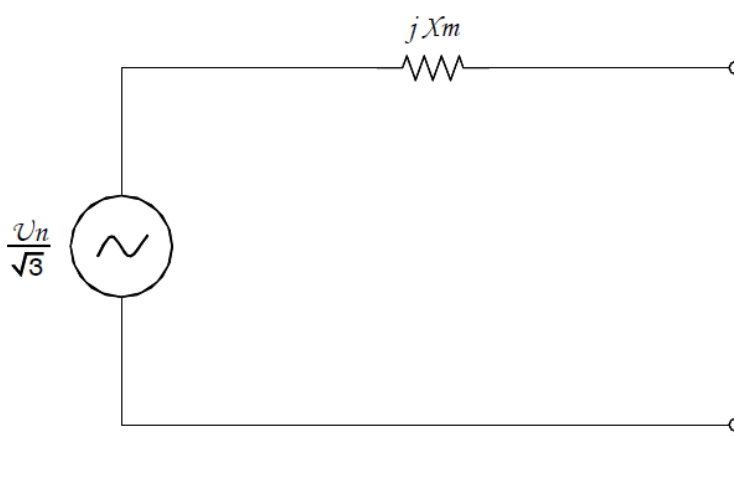
$$X_{mE} = 0.2 \cdot \frac{Un^2}{\sum Sn}$$

$$\overline{Z}_{mE} = jX_{mE} = j \cdot 0.2 \frac{Un^2}{\sum Sn}$$

Modelado de elementos ante el CC

- Motores Asíncronos

Finalmente, el modelo que representará los motores asíncronos para el cálculo de CC es el siguiente:

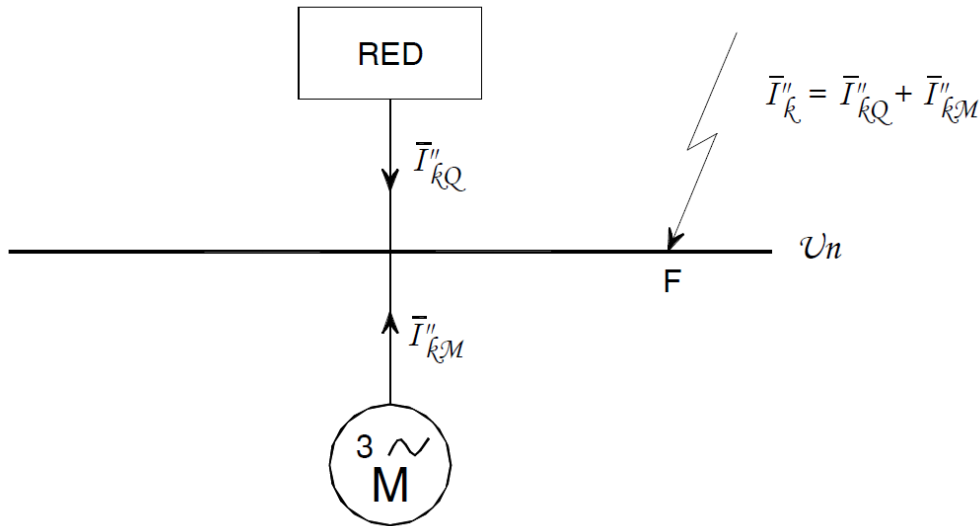


$$X_m = 0.2 \frac{U_n^2}{S_n}$$

Modelado de elementos ante el CC

- Motores Asíncronos

Puede despreciarse el aporte al CC de los motores de inducción en una instalación, en la medida que la potencia de los mismos sea pequeña en comparación a la potencia de CC de la instalación:



$$I''_{kM} \leq 0.05 \cdot I''_{kQ}$$

$$I''_{kM} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X_{mE}} \cong Ia \cong 5 \sum_i In_i$$

Por lo que el aporte puede despreciarse si se cumple:

$$\sum_i In_i \leq 0.01 \cdot I''_{kQ}$$